



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Pengaruh Media Pendingin dan *Post-weld heat treatment* Terhadap Sifat Mekanik dan Mikrostruktur Sambungan Las TIG *Dissimilar* ASTM A36–SS304

Raeahqie De Warent¹⁾, Parlindungan Manik²⁾, Wilma Amiruddin³⁾

¹⁾ Laboratorium Teknologi Material, Las, dan Produksi Kapal

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

^{*)}e-mail : raehaqiedewarent@students.undip.ac.id

Abstrak

Pengelasan *dissimilar* antara baja karbon ASTM A36 dan *stainless steel* SS 304 banyak digunakan dalam industri karena memungkinkan penggabungan sifat mekanik dan ketahanan korosi dari kedua material. Namun, perbedaan karakteristik metalurgi antara kedua material dapat memengaruhi sifat mekanik dan struktur mikro sambungan las. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh *post-weld heat treatment* (PWHT) dan pendinginan menggunakan air laut terhadap sifat mekanik dan struktur mikro sambungan las *dissimilar* ASTM A36–SS 304 yang dilas menggunakan proses *tungsten inert gas* (TIG) dengan *filler metal* ER309L. Penelitian dilakukan menggunakan tiga variasi perlakuan, yaitu kondisi *as-welded*, PWHT pada temperatur 600 °C selama 30 menit, serta pendinginan menggunakan air laut selama 30 detik yang dilanjutkan dengan PWHT pada temperatur 600 °C selama 30 menit. Pengujian meliputi uji tarik, uji tekuk, dan pengamatan struktur mikro pada daerah *base metal*, *heat affected zone* (HAZ), dan *weld metal*. Hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa kondisi *as-welded* menghasilkan nilai rata-rata *ultimate tensile strength* (UTS) tertinggi sebesar 436,41 MPa, sedangkan perlakuan PWHT dan pendinginan air laut yang dilanjutkan PWHT menghasilkan nilai UTS masing-masing sebesar 412,44 MPa dan 367,75 MPa. Pada pengujian tekuk, perlakuan PWHT menghasilkan nilai rata-rata *ultimate flexural strength* tertinggi sebesar 822,47 MPa, diikuti kondisi *as-welded* sebesar 808,90 MPa dan perlakuan pendinginan air laut yang dilanjutkan PWHT sebesar 714,54 MPa. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa patahan pada pengujian tarik dan deformasi pada pengujian tekuk terjadi pada logam dasar ASTM A36, sedangkan daerah sambungan las tidak mengalami kegagalan. Berdasarkan hasil penelitian, perlakuan PWHT tidak meningkatkan kekuatan tarik sambungan, tetapi menghasilkan nilai kekuatan lentur tertinggi. Sementara itu, kombinasi pendinginan air laut dan PWHT menghasilkan penurunan nilai kekuatan tarik dan lentur dibandingkan kondisi *as-welded*.

Kata Kunci : *Tungsten Inert Gas* (TIG), ASTM A36, SS 304, *Post-weld heat treatment* (PWHT), air laut.

1. PENDAHULUAN

Pengelasan merupakan proses penyambungan logam melalui pemanasan lokal hingga terbentuk ikatan metalurgi antara logam induk dan logam pengisi, dimana panas dari busur listrik pada las elektroda terbungkus tidak hanya mencairkan material dan membentuk *weld pool* yang kemudian membeku menjadi logam las, tetapi juga mempengaruhi daerah sekitar sambungan yang dikenal sebagai *Heat affected zone* (HAZ) [1].

Pada pengelasan material logam, terutama baja berbeda jenis (*dissimilar welding*), parameter seperti arus, tegangan, dan kecepatan pengelasan sangat berpengaruh terhadap pembentukan struktur mikro serta sifat mekanik sambungan las, termasuk distribusi fasa dan kekuatan tarik yang dihasilkan [2]. Di sisi lain, karakteristik korosi material logam, khususnya baja karbon dan baja tahan karat, juga sangat dipengaruhi oleh lingkungan serta struktur mikro yang terbentuk setelah proses manufaktur [3], [4].

Seiring berkembangnya industri maritim, penggunaan pengelasan logam tidak sejenis (*Dissimilar Metal Welding*) semakin banyak diterapkan untuk meningkatkan efisiensi material dan kinerja struktur, salah satunya yaitu melalui kombinasi baja tahan karat SS 304 yang memiliki ketahanan korosi dan keuletan tinggi dengan baja karbon rendah ASTM A36 yang dikenal kuat, mudah dilas, serta ekonomis, sehingga sangat sesuai untuk pengaplikasian di sektor perkapalan yang membutuhkan ketahanan lingkungan laut sekaligus efisiensi biaya, dimana ASTM A36 sendiri merupakan baja struktural standar ASTM yang banyak digunakan pada konstruksi, tangki, pipa, kapal, dan kereta api, serta umumnya dilas menggunakan metode SMAW, GMAW, dan GTAW [5], [6]. Pengelasan *dissimilar* antara ASTM A36 dan *stainless steel* 304 (SS 304) banyak diterapkan pada industri petrokimia, pembangkit listrik, dan konstruksi karena mampu mengombinasikan kekuatan mekanik baja karbon dengan ketahanan korosi baja tahan karat. Namun, perbedaan komposisi kimia, konduktivitas termal, koefisien muai panas, serta mekanisme transformasi fasa pada kedua material menyebabkan kompleksitas pada pembentukan mikrostruktur sambungan las. Kondisi tersebut dapat memengaruhi distribusi kekerasan, kekuatan tarik, ketangguhan, serta potensi terjadinya distorsi dan retak pada daerah logam las (weld metal) maupun heat affected zone (HAZ) [7], [8]. Selain parameter pengelasan, evolusi mikrostruktur pada sambungan *dissimilar* baja karbon dan baja tahan karat sangat dipengaruhi oleh masukan panas (heat input) [9]. Selain itu, perbedaan sifat termal antara kedua material merupakan faktor utama penyebab distorsi pengelasan, sehingga optimasi parameter proses diperlukan untuk meminimalkan deformasi dan meningkatkan keandalan struktur hasil pengelasan [10].

Pemilihan metode pengelasan dan perlakuan pasca pengelasan menjadi faktor penting dalam mengatasi permasalahan tersebut. Pengelasan *tungsten inert gas* (TIG) menjadi metode yang paling banyak digunakan karena keserbagunaan dan presisinya [11], [12].

Metode *tungsten inert gas* (TIG) banyak digunakan karena mampu menghasilkan sambungan las berkualitas tinggi dengan kontrol panas yang lebih baik, sedangkan perlakuan panas setelah dilakukan pengelasan (Post Weld Heat Treatment/PWHT) berperan penting dalam memperbaiki sifat mekanik dan mikrostruktur sambungan las melalui pengurangan tegangan sisa serta peningkatan keuletan material, meskipun pada kondisi tertentu dapat menyebabkan penurunan kekuatan tarik [13]. Tantangan utama

pada pengelasan *dissimilar* adalah perbedaan sifat termal dan metalurgi kedua logam yang dapat menyebabkan pembentukan fasa getas, tegangan sisa, segregasi unsur paduan, serta perubahan mikrostruktur pada daerah fusion zone (FZ) dan heat affected zone (HAZ) [14].

Parameter pengelasan juga berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik hasil las. Singh et al. melaporkan bahwa arus pengelasan 110 A dan laju aliran gas pelindung 10 L/menit menghasilkan kekuatan tarik optimum pada sambungan tidak sejenis yang diteliti [15].

PWHT atau perlakuan panas pasca-las adalah prosedur pemanasan yang digunakan untuk mengurangi tegangan sisa yang disebabkan oleh panas dari proses pengelasan dan mengembalikan karakteristik mekanis logam [16]. Studi pada sambungan AISI 304L dan AISI 316L menunjukkan bahwa daerah logam las memiliki nilai kekerasan tertinggi akibat terjadinya grain refinement, meskipun kekuatan tarik sambungan masih lebih rendah dibandingkan logam induk [17]. Perlakuan Post Weld Heat Treatment (PWHT) pada sambungan las *dissimilar* yang dibuat menggunakan proses *tungsten inert gas* (TIG) terbukti memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik mikrostruktur dan sifat mekanik sambungan [18]. Kumar et al melaporkan bahwa penerapan PWHT pada sambungan *dissimilar* T91/Super304H hasil pengelasan TIG menghasilkan mikrostruktur yang lebih homogen, ukuran butir yang lebih halus, serta presipitasi karbida yang lebih stabil [19]. Selain itu, pemilihan jenis filler dan gas pelindung juga berperan penting dalam meningkatkan performa sambungan [20].

Quenching merupakan proses perlakuan panas dengan pendinginan cepat dari temperatur austenisasi, umumnya pada kisaran 815°C–870°C pada baja, dimana keberhasilannya dipengaruhi oleh media pendingin yang digunakan berdasarkan hardenability material, ketebalan dan bentuk benda kerja, serta struktur mikro yang diinginkan, dengan media quenching yang umum digunakan berupa cairan maupun gas [21]. Perlakuan termal dan metode pendinginan juga berpengaruh terhadap sifat mekanik baja, di mana variasi media pendingin dapat menyebabkan perubahan kekuatan tarik dan karakteristik regangan material [22]. Selain itu, distribusi karbon selama proses pendinginan dengan air laut juga berperan penting dalam menentukan stabilitas austenit sisa dan mikrostruktur akhir yang terbentuk [23]. Variasi kondisi termal akibat perbedaan laju pendinginan dapat menyebabkan perubahan ukuran konstituen martensit/austenit (M/A), kerapatan batas butir

sudut tinggi (high-angle grain boundaries), serta morfologi mikrostruktur yang terbentuk [24].

Ikumapayi et al [25]. Meneliti pengaruh beberapa media pendingin, yaitu udara, air, oli diesel, dan larutan garam (brine solution), terhadap sambungan las baja karbon rendah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendinginan menggunakan larutan garam menghasilkan nilai kekuatan impak terendah dibandingkan media pendingin lainnya, sedangkan pendinginan udara menghasilkan kekuatan impak tertinggi, dan kondisi tersebut menunjukkan bahwa media pendingin dengan laju pendinginan yang lebih tinggi cenderung menghasilkan struktur yang lebih keras namun lebih getas [25], [26].

Berdasarkan hasil penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa penggunaan media pendingin air laut atau larutan garam berpotensi meningkatkan laju pendinginan dan pembentukan struktur yang lebih keras, namun juga dapat menurunkan ketangguhan material serta meningkatkan risiko degradasi sifat mekanik apabila material terpapar lingkungan korosif dalam jangka waktu tertentu [27]. Sonar et al juga menyatakan bahwa perubahan laju pendinginan akibat variasi parameter TIG berpengaruh terhadap perkembangan mikrostruktur pada daerah logam las dan HAZ sehingga memengaruhi kekuatan tarik dan regangan sambungan [28]. Media pendingin udara pada sambungan las TIG memiliki pengaruh terhadap laju pendinginan setelah proses pengelasan, yang selanjutnya menentukan evolusi mikrostruktur, tegangan sisa, serta sifat mekanik sambungan [29][30]. Secara umum, perubahan mikrostruktur akibat siklus termal pengelasan merupakan faktor utama yang menentukan sifat mekanik sambungan las, dimana hubungan antara parameter proses, penyempurnaan mikrostruktur, dan performa mekanik telah banyak dibahas dalam penelitian pengelasan material logam [31].

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Arivazhagan dan Vasudevan menyebutkan bahwa analisis mikrofotografi merupakan metode yang penting untuk mengevaluasi karakteristik mikrostruktur pada sambungan las TIG karena struktur yang terbentuk akan menentukan sifat mekanik hasil pengelasan [32]. Sambungan *dissimilar* P91–316L hasil pengelasan A-TIG menunjukkan keberadaan fasa δ -ferrite, austenit, dan martensit pada zona yang berbeda di sepanjang sambungan las. Pada sisi baja P91 terbentuk struktur martensit akibat laju pendinginan yang tinggi, sedangkan logam las didominasi campuran austenit dan δ -ferrite [33]. Penelitian lain oleh Sakthivel et al menunjukkan bahwa sambungan TIG dan A-TIG memiliki perbedaan distribusi δ -ferrite, orientasi butir kolumnar, serta

pembentukan fasa karbida $M_{23}C_6$, σ -phase, dan Laves phase yang berpengaruh terhadap ketahanan sambungan pada temperatur tinggi [34].

2. METODE

Penelitian ini difokuskan pada sambungan las *dissimilar* antara baja tahan karat SS 304 dan baja karbon rendah ASTM A36 yang dilas menggunakan metode *tungsten inert gas* (TIG), dengan pengumpulan data melalui pengujian mekanik berupa uji tarik serta analisis struktur mikro pada daerah base metal, Heat affected zone (HAZ), dan weld metal setelah proses pengelasan dan perlakuan pasca pengelasan dilakukan, dimana hasil uji tarik digunakan untuk mengevaluasi kekuatan sambungan sedangkan analisis struktur mikro bertujuan menilai perubahan karakteristik metalurgi akibat perlakuan yang diterapkan

Penelitian ini dilakukan dengan memberikan perlakuan pasca pengelasan berupa variasi media pendingin dan Post Weld Heat Treatment (PWHT) pada sambungan las *dissimilar* SS 304 dan ASTM A36, dimana variabel bebas meliputi penggunaan media pendingin air laut serta PWHT pada suhu 600°C selama 30 menit, sedangkan variabel terikat berupa kekuatan tarik sambungan las dan karakteristik struktur mikro, dengan variabel tetap mencakup metode pengelasan TIG, elektroda EWTh-2, arus 120 A, posisi pengelasan 1G, kecepatan pengelasan 5 mm/s, serta material dasar SS 304 dan ASTM A36 setebal 6 mm. Penelitian dilaksanakan secara eksperimental di beberapa laboratorium Universitas Diponegoro Semarang dan Workshop Inlastek Welding Institute Surakarta, dimulai dari persiapan material, proses pengelasan TIG, pendinginan menggunakan air laut, perlakuan PWHT, hingga pengujian tarik dan pengamatan struktur mikro untuk memperoleh data sifat mekanik dan metalurgi sambungan las. Peralatan yang digunakan meliputi mesin las TIG, mesin uji tarik, oven PWHT, perangkat grinding dan polishing, serta mikroskop optik, sedangkan material penelitian terdiri atas SS 304, ASTM A36, elektroda tungsten EWTh-2, gas argon, dan media pendingin air laut

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi perilaku tarik sambungan las *dissimilar* ASTM A36–SS304 hasil pengelasan TIG pada berbagai kondisi perlakuan pasca pengelasan, menganalisis respons tekuk setelah perlakuan PWHT dan pendinginan menggunakan media air laut, memprediksi konstitusi logam las melalui Diagram Schaeffler berdasarkan tingkat dilusi filler ER309L, serta mengkorelasikan karakteristik mekanik yang diperoleh dengan hasil pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik.

2.1. Pengumpulan Data

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental yang bertujuan untuk menganalisis kekuatan tarik dan tekuk pada sambungan las TIG (*tungsten inert gas dissimilar*) antara baja ASTM A36 dan *stainless steel* SS304 dengan variasi durasi serta media pendinginan, yang dilakukan melalui beberapa tahapan mulai dari persiapan alat dan material, proses pengelasan, pendinginan pasca pengelasan, pembuatan spesimen uji, hingga pengujian tarik dan tekuk pada spesimen yang telah disiapkan

Baja ASTM A36 merupakan baja karbon rendah (low carbon steel) yang banyak digunakan dalam konstruksi, manufaktur, dan aplikasi pengelasan karena memiliki sifat mekanik yang baik, kemampuan las yang tinggi (good weldability), serta biaya produksi yang relatif rendah. Baja ini termasuk dalam kelompok baja struktural yang distandarkan oleh American Society for Testing and Materials (ASTM) melalui spesifikasi ASTM A36/A36M. Kandungan karbon yang relatif rendah menyebabkan material ini memiliki tingkat keuletan yang baik sehingga mudah dilakukan proses fabrikasi seperti pemotongan, pembentukan, dan pengelasan.

ASTM A36 tersusun dari unsur utama besi (Fe) dengan penambahan unsur paduan berupa karbon (C), mangan (Mn), silikon (Si), fosfor (P), dan sulfur (S). Kandungan karbon pada baja ini dibatasi untuk mempertahankan kemampuan las dan mengurangi kemungkinan terjadinya cacat seperti retak pada daerah sambungan las. Unsur mangan berperan dalam meningkatkan kekuatan dan membantu mengikat sulfur, sedangkan silikon berfungsi sebagai unsur deoksidator selama proses pembuatan baja. Komposisi kimia ASTM A36 dapat berbeda pada setiap produk karena dipengaruhi oleh proses manufaktur, tetapi tetap berada dalam batas yang telah ditentukan oleh standar ASTM A36/A36M. Komposisi kimia baja ASTM A36 yang digunakan sebagai material penelitian ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi Baja ASTM A36 [1].

No	Unsur	Kandungan %
1	Karbon (C)	0.25%
2	Tembaga (Cu),	0.2%
3	Besi, (Fe)	98%
4	Mangan (Mn)	0.8%
5	Fosfor (P)	0.03%
6	Silikon (Si)	0.4%
7	Sulfur (S)	0.03%

Stainless steel 304 (SS304) merupakan jenis baja tahan karat austenitik yang banyak digunakan pada berbagai aplikasi industri karena memiliki ketahanan korosi yang baik, sifat mekanik yang stabil, serta kemampuan las (weldability) yang

tinggi. Material ini termasuk dalam kelompok baja tahan karat kromium-nikel (*chromium-nickel stainless steel*) dengan unsur utama berupa kromium (Cr) dan nikel (Ni). Kandungan kromium berperan dalam pembentukan lapisan pasif kromium oksida (Cr_2O_3) yang memberikan perlindungan terhadap korosi, sedangkan nikel berfungsi sebagai penstabil struktur austenitik dan meningkatkan ketangguhan material. SS304 memiliki komposisi kimia yang terdiri dari unsur utama besi (Fe) sebagai matriks dengan penambahan unsur paduan seperti kromium (Cr), nikel (Ni), mangan (Mn), silikon (Si), karbon (C), fosfor (P), sulfur (S), dan nitrogen (N). Komposisi kimia material SS304 yang digunakan pada penelitian dapat berbeda dalam batas tertentu karena dipengaruhi oleh proses manufaktur dan hasil pengujian aktual material. Namun, secara umum komposisi tersebut tetap mengikuti standar material SS304. Komposisi kimia *Stainless steel* 304 yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi Baja SS 304 [36].

No	Unsur	Kandungan %
1	Karbon (C)	≤ 0.08
2	Kromimum (Cr)	18.0–20.0
3	Besi, (Fe)	Balance
4	Mangan (Mn)	≤ 2.00
5	Fosfor (P)	≤ 0.045
6	Silicon (Si)	≤ 1.00
7	Sulfur (S)	≤ 0.030
8	Nikel (Ni)	8.0–10.50
9.	Nitrogen (N)	$\leq 0,10$

Filler ER309L merupakan logam pengisi baja tahan karat austenitik yang banyak digunakan pada pengelasan material berbeda (*dissimilar welding*) antara baja karbon dan baja tahan karat. Kandungan kromium (Cr) dan nikel (Ni) yang tinggi pada filler ini berperan dalam meningkatkan ketahanan korosi dan menjaga kestabilan struktur austenitik pada logam las. Selain itu, kadar karbon yang rendah membantu mengurangi risiko korosi antar butir (*intergranular corrosion*) setelah proses pengelasan. Komposisi kimia filler ER309L dapat dilihat pada Tabel 3

Tabel 3. Komposisi Filler ER309L [2].

No	Unsur	Kandungan %
1.	Karbon (C),	$\leq 0,030$
2.	Silikon (Si),	0,30–0,65
3.	Mangan (Mn),	1,00–2,50
4.	Fosfor (P),	$\leq 0,030$
5.	Sulfur (S),	$\leq 0,030$
6.	Kromium (Cr),	23,00–25,00
7.	Nikel (Ni),	12,00–14,00
8.	Molibdenum (Mo),	$\leq 0,75$
9.	Tembaga (Cu),	$\leq 0,75$

Elektroda EWTh-2 merupakan elektroda tungsten non-konsumsi yang umum digunakan pada proses pengelasan GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) sebagai penghantar arus untuk menghasilkan busur listrik. Elektroda ini memiliki komposisi utama berupa tungsten (W) dengan penambahan thorium oksida (ThO₂) sekitar 2%. Penambahan unsur ThO₂ berfungsi untuk meningkatkan kemampuan emisi elektron, mempermudah penyalan busur (*arc starting*), serta menjaga kestabilan busur selama proses pengelasan. Selain itu, kandungan tungsten yang tinggi memberikan ketahanan terhadap temperatur tinggi karena memiliki titik lebur yang sangat tinggi. Komposisi kimia elektroda EWTh-2 dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Komposisi Elektroda E-Wth2 [3].

No	Unsur	Kandungan %
1.	Tungsten (W),	±97,3
2.	Thorium Oksida (ThO ₂)	±2,0
3.	Unsur pengotor lainnya (<i>impurities</i>)	≤ 0.5

2.2. Tahap Penelitian

Pengerjaan spesimen dimulai dengan memotong plat baja ASTM A36 dan *Stainless steel* SS304 ukuran 750 x 100 x 6 mm menjadi ukuran 125 x 100 x 6 mm sehingga menghasilkan 12 buah plat.

Proses selanjutnya adalah dilakukan pengelasan dengan metode TIG untuk menyatukan antara plat baja ASTM A36 dan SS304 seperti pada gambar 1.



Gambar 1. Pengelasan Pelat

Proses pengelasan pada penelitian ini menggunakan metode *tungsten inert gas* (TIG) dengan jenis sambungan *butt joint* pada posisi pengelasan 1G. Elektroda yang digunakan adalah EWTh-2 dengan *filler* ER309L berdiameter 2,4 mm. Logam induk yang digunakan terdiri atas baja ASTM A36 dan *stainless steel* SS304. Proses

pengelasan dilakukan dengan arus listrik sebesar 120 A, tegangan 12 V, dan polaritas *Direct Current Electrode Negative* (DCEN). Kecepatan pengelasan (*travel speed*) yang digunakan sebesar 5 cm/min dengan jumlah *pass* sebanyak 2 *pass*. Gas pelindung yang digunakan adalah argon dengan laju aliran sebesar 12–15 L/min.

Setelah proses pengelasan selesai, spesimen dibagi berdasarkan perlakuan yang diberikan, yaitu spesimen tanpa perlakuan (*as-welded*), spesimen yang diberikan perlakuan panas pasca pengelasan (Post Weld Heat Treatment/PWHT), serta spesimen yang didinginkan menggunakan media air laut selama 30 detik dan kemudian diberikan perlakuan PWHT. Pada kondisi *as-welded*, spesimen didinginkan secara alami pada udara terbuka hingga mencapai temperatur ruang. Selanjutnya, proses PWHT dilakukan pada temperatur 600°C selama 30 menit. Setelah seluruh perlakuan pasca pengelasan selesai, pelat dipotong menjadi beberapa spesimen sesuai dengan dimensi yang telah ditentukan untuk pengujian tarik dan tekuk. Dari keseluruhan proses pemotongan dan perlakuan tersebut diperoleh 21 spesimen uji, yang selanjutnya digunakan untuk menganalisis pengaruh media pendingin dan PWHT terhadap sifat mekanik sambungan las *tungsten inert gas* (TIG) *dissimilar* ASTM A36–SS304.



Gambar 2. Pendinginan Dengan Air laut



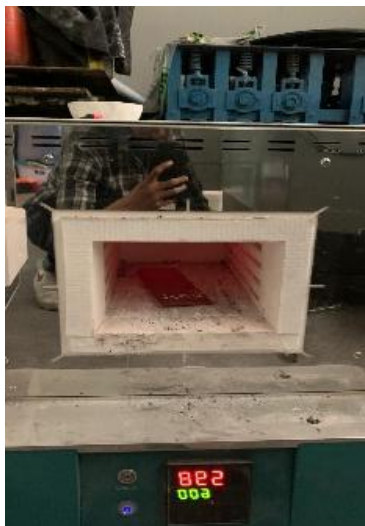
Gambar 3. Pendinginan Dengan Udara

Proses *post weld heat treatment* (PWHT) dilakukan pada spesimen hasil pengelasan *dissimilar* antara baja SS 304 dan ASTM A36. Metode PWHT di duga dapat menurunkan resiko kerusakan, meratakan struktur mikro secara

konsisten, dan melepaskan tegangan sisa pada material yang telah mengalami proses pengelasan, yang semuanya meningkatkan kualitas material

Spesimen dimasukkan ke dalam oven pemanas listrik dan dipanaskan hingga mencapai suhu 600 °C. Setelah suhu target tercapai, spesimen ditahan (*holding time*) selama 30 menit untuk memastikan distribusi panas yang merata pada daerah logam las, *heat affected zone* (HAZ), dan logam induk. Selama proses pemanasan, suhu dijaga tetap konstan untuk menghindari fluktuasi yang dapat memengaruhi hasil perlakuan panas.

Setelah waktu penahanan tercapai, spesimen dikeluarkan dari oven dan didinginkan secara alami di udara terbuka hingga mencapai suhu ruang. Metode pendinginan ini dipilih untuk mencegah pembentukan tegangan sisa baru akibat laju pendinginan yang terlalu cepat. Spesimen hasil PWHT selanjutnya digunakan untuk pengujian tarik dan analisis struktur mikro.

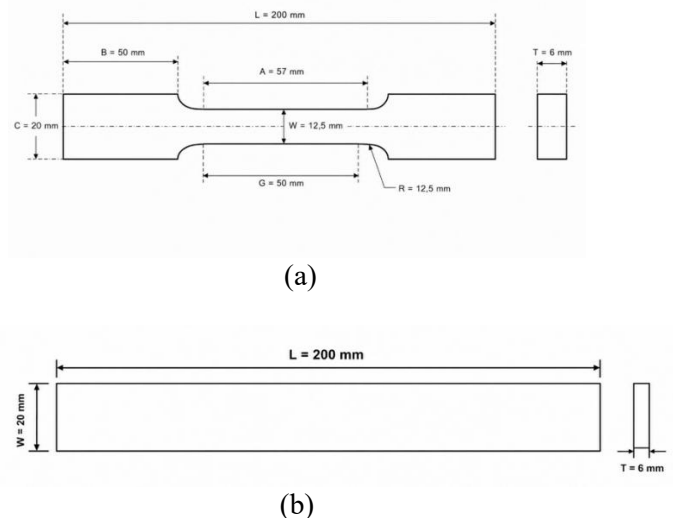


Gambar 4. Pemanasan spesimen dengan PWHT

2.3 Tahapan Pengujian

Perlakuan panas pasca pengelasan (*post weld heat treatment*/PWHT) dilakukan pada spesimen sambungan las *dissimilar* ASTM A36–SS304. Spesimen dibagi menjadi tiga kondisi perlakuan, yaitu tanpa perlakuan (*as-welded*), PWHT, serta pendinginan menggunakan air laut yang dilanjutkan dengan PWHT. Pada perlakuan PWHT, spesimen dipanaskan menggunakan oven listrik hingga temperatur 600°C dan ditahan selama 30 menit untuk memastikan distribusi panas yang merata pada weld metal, *heat affected zone* (HAZ), dan base metal. Setelah *holding time* selesai, spesimen dikeluarkan dari oven dan didinginkan secara alami menggunakan udara hingga mencapai temperatur ruang. Pada perlakuan air laut dan

PWHT, spesimen terlebih dahulu direndam dalam media air laut selama 30 detik, kemudian diberikan perlakuan PWHT dengan parameter yang sama. Seluruh spesimen selanjutnya dipersiapkan untuk pengujian tarik, tekuk, dan pengamatan mikrostruktur. Detail ukuran spesimen uji tarik dan tekuk seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. (a) Spesimen Uji Tarik, (b) Spesimen Uji Tekuk

Proses pengujian tarik dan tekuk spesimen dilakukan di Laboratorium Struktur dan Kekuatan Kapal, Departemen Teknik Perkapalan, Universitas Diponegoro, Semarang. Pengujian tarik bertujuan untuk menguji sifat mekanis dari sambungan las meliputi kekuatan tarik, kekuatan lentur, pemanjangan dan pengurangan material. Terdapat beberapa parameter yang dihasilkan dari uji tarik meliputi, tegangan tarik maksimum (σ), regangan maksimum (e), dan modulus elastisitas (E). Besarnya tegangan tarik maksimum pada pengujian dinyatakan dengan rumus persamaan 1:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad \text{.....} \quad (1)$$

σ menunjukkan besaran nilai tegangan nilai tarik maksimum (MPa), P merupakan beban maksimum (N), dan A_0 adalah luas penampang awal (mm^2).

Besar regangan merupakan perbandingan antara pertambahan panjang akibat pembebanan terhadap panjang daerah ukur (*gauge length*). Adapun nilai regangan merupakan regangan proporsional yang diperoleh dari garis linier pada grafik tegangan – regangan hasil uji tarik. Nilai regangan dinyatakan dalam rumus persamaan 2:

$$\varepsilon = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\% \quad \text{.....} \quad (2)$$

ϵ menyatakan besaran regangan tertinggi yang tercapai sebelum spesimen mengalami pecah (%), L_i menandakan panjang spesimen setelah patah (mm), dan L_o merupakan panjang awal spesimen sebelum pengujian (mm). Nilai modulus elastisitas diperoleh dari perbandingan antara tegangan dan regangan pada wilayah proporsional. dapat dihitung dengan persamaan 3:

$$E = \frac{\sigma_y}{e} \dots\dots\dots (3)$$

E melambangkan nilai modulus elastisitas (MPa), σ_y merepresentasikan nilai tegangan luluh (MPa), dan e menunjukkan besar regangan (%). *Fracture energy* atau energi patah merupakan keseluruhan energi yang diserap material hingga terjadi kehancuran ketika dikenakan beban tarik. *Fracture energy* dinyatakan dengan persamaan 4:

$$u = \frac{1}{2}\sigma\epsilon \dots\dots\dots (4)$$

u merepresentasikan nilai *Fracture energy* (MJ/m³), σ menunjukkan besar tegangan tarik maksimum (MPa), dan ϵ menyatakan nilai regangan maksimum. Uji tekuk (*bending test*) dilakukan untuk mengukur besar tegangan maksimum pada masing-masing variasi material yang telah dilas dan didinginkan menggunakan berbagai media pendingin. Tegangan tekuk maksimum dinyatakan dengan persamaan 5:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \dots\dots\dots (5)$$

σ merepresentasikan kekuatan tekuk maksimum (MPa), P menunjukkan besar beban (N), L menyatakan panjang span (mm), b menunjukkan lebar spesimen uji (mm), dan d merupakan tebal spesimen uji (mm). *Fracture strain* atau regangan patah dalam pengujian tekuk merupakan regangan maksimum yang terjadi pada bagian terluar spesimen saat mengalami kehancuran akibat pembebanan tekuk. *Fracture strain* dinyatakan dalam persamaan 6:

$$\epsilon_f = \frac{6t\delta_f}{L^2} \dots\dots\dots (6)$$

ϵ_f menunjukkan nilai *fracture strain* atau regangan patah, t merupakan tebal spesimen (mm), δ_f menyatakan besar defleksi maksimum (mm), dan L adalah panjang span (mm). *Fracture energy* atau energi patah merupakan keseluruhan energi yang diserap spesimen hingga terjadi kehancuran

saat proses pembebanan tekuk. *Fracture energy* dinyatakan dalam persamaan 7:

$$u = \frac{1}{2}\sigma\epsilon \dots\dots\dots (7)$$

u merepresentasikan seberapa besar nilai *Fracture energy* (MJ/m³), σ menunjukkan seberapa besar tegangan untuk nilai tekuk maksimum (MPa), dan ϵ menyatakan seberapa besar nilai *Fracture strain* atau regangan patah.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Diagram Schaeffler

Diagram Schaeffler merupakan diagram konstitusi yang digunakan untuk memprediksi struktur mikro logam las berdasarkan komposisi kimia hasil pencampuran logam induk dan logam pengisi. Prediksi dilakukan menggunakan nilai *chromium equivalent* (CrEq) dan *nickel equivalent* (NiEq), sehingga dapat diketahui kecenderungan terbentuknya fasa austenit, ferit, martensit, karbida, maupun sigma. Pada penelitian ini, Diagram Schaeffler digunakan untuk memperkirakan struktur mikro sambungan las *dissimilar* ASTM A36–SS304 menggunakan filler ER309L serta mengevaluasi potensi terbentuknya δ -ferrite yang berperan dalam meningkatkan ketahanan terhadap retak panas (*hot cracking*).

Filler ER309L dipilih karena kandungan kromium (Cr) dan nikel (Ni) yang tinggi mampu mengompensasi efek dilusi dari sisi baja karbon ASTM A36 serta mendorong terbentuknya struktur logam las berupa campuran austenit dan δ -ferrite, yang memiliki ketahanan lebih baik terhadap terjadinya retak panas (*hot cracking*).

Pada penelitian ini, Diagram Schaeffler digunakan untuk memprediksi struktur mikro sambungan las *dissimilar* ASTM A36–SS304 dengan filler ER309L. Nilai *chromium equivalent* (CrEq) dan *nickel equivalent* (NiEq) dihitung menggunakan persamaan Schaeffler .

Persamaan *Chromium Equivalent*

$$CrEq = Cr + Mo + 1.5Si + 0.5Nb \dots\dots\dots(8)$$

Persamaan *Nickel Equivalent*

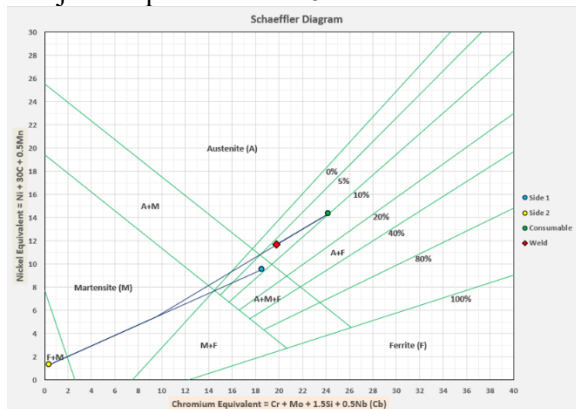
$$NiEq = Ni + 30C + 0.5Mn \dots\dots\dots (9)$$

Tabel 5. Nilai CrEq dan NiEq Masing-Masing Material

Material	CrEq	NiEq
ASTM A36	0.60	7.90
SS304	19.50	11.40

Material	CrEq	NiEq
ER309L	24.75	14.50

Hasil perhitungan *chromium equivalent* (CrEq) dan *Nickel Equivalent* (NiEq) selanjutnya diplot pada Diagram Schaeffler untuk menentukan daerah konstitusi serta memprediksi fasa yang terbentuk pada logam las. Diagram Schaeffler ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram Schaeffler

Berdasarkan Diagram Schaeffler, diperoleh koordinat *Side 1* (ASTM A36) sekitar (18,50; 8,60), *Side 2* (SS304) sekitar (0,50; 0,00), dan *Consumable* (ER309L) sekitar (24,15; 13,72). Hasil perhitungan komposisi gabungan logam las (*Weld*) menghasilkan koordinat sekitar (19,67; 10,81). Koordinat tersebut digunakan untuk menentukan posisi logam las pada diagram Schaeffler berdasarkan nilai *Chromium Equivalent*

3.2 Hasil Pengujian Tarik

Uji tarik dilakukan menggunakan *universal testing machine* (UTM) dengan cara spesimen dijepit lalu diberi beban tarik secara bertahap sampai patah. Selama proses ini, mesin mencatat hubungan antara gaya dan pertambahan panjang sehingga terbentuk grafik tegangan-regangan. Dari grafik tersebut dapat diketahui sifat mekanik material seperti tegangan luluh, tegangan maksimum (ultimate), modulus elastisitas, dan tingkat keuletan sambungan las [39].

Bagian ini menampilkan hasil pengujian sambungan las *dissimilar* dengan memvariasikan media dan durasi pendinginan serta *post weld heat treatment* untuk mengkaji dampak perlakuan pendinginan terhadap kekuatan tarik dan tekuk. Pengujian ini dilaksanakan mengacu pada standar yang ditetapkan oleh ASTM E8. Perbandingan hasil uji tarik untuk setiap variasi media dan waktu pendinginan ditunjukkan pada tabel 6, 7 & 8.

Tabel 6. Hasil Pengujian Tarik (Tanpa Perlakuan)

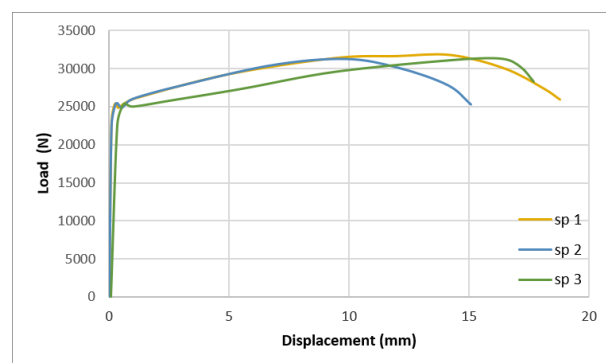
Spesimen	Yield Strength (MPa)	Young modulus (GPa)	Ultimate strength (MPa)	Fracture strain	Fracture Energy (MJ/m ³)
A	319.56	207.42	441.26	0.313	69.14
B	311.80	202.39	433.98	0.251	54.53
C	314.08	203.87	433.98	0.295	64.02
Rata-rata	315.145	204.56	436.41	0.287	62.56
Stdev	3.99	2.59	4.20	0.03	7.41

Tabel 7. Hasil Pengujian Tarik (PWHT)

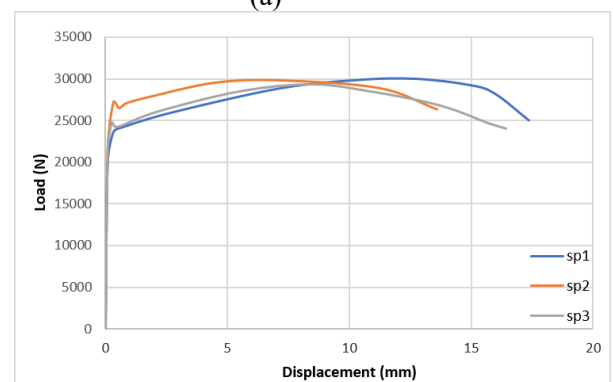
Spesimen	Yield Strength (MPa)	Young modulus (GPa)	Ultimate strength (MPa)	Fracture strain	Fracture Energy (MJ/m ³)
A	290.28	203.27	417.01	0.290	60.37
B	299.39	203.16	413.19	0.226	46.76
C	299.22	200.77	407.12	0.273	55.67
Rata-rata	296.30	202.401	412.44	0.263	54.27
stdev	5.21	1.41	4.99	0.03	6.91

Tabel 8. Hasil Pengujian Tarik (Air Laut)

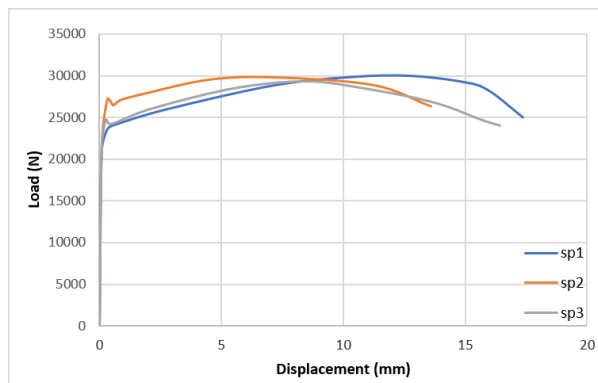
Spesimen	Yield Strength (MPa)	Young modulus (GPa)	Ultimate strength (MPa)	Fracture strain	Fracture Energy (MJ/m ³)
A	282.29	196.98	367.63	0.27	50.31
B	290.83	192.92	361.48	0.23	41.24
C	301.33	191.36	374.15	0.26	47.71
Rata-Rata	291.48	193.75	367.75	0.25	46.42
Stdev	9.53	2.90	6.34	0.02	4.67



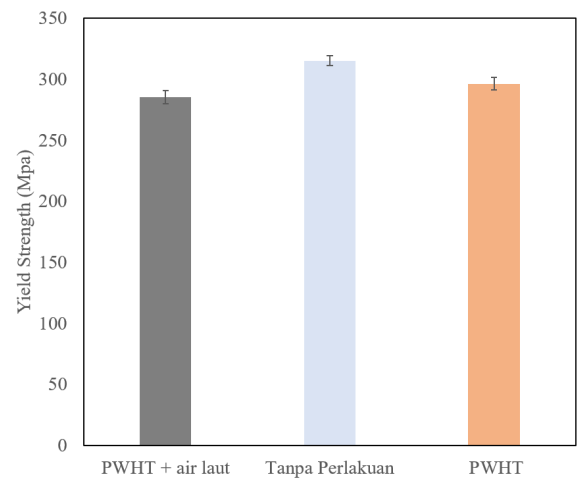
(a)



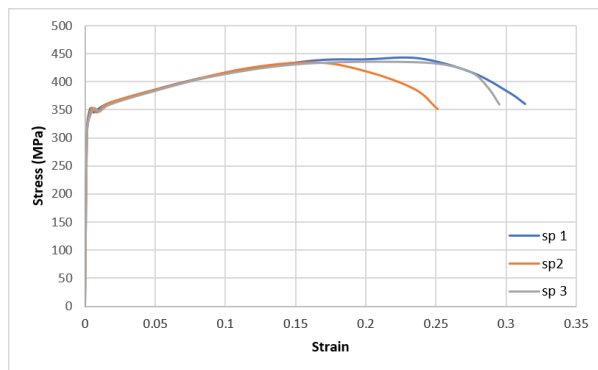
(b)



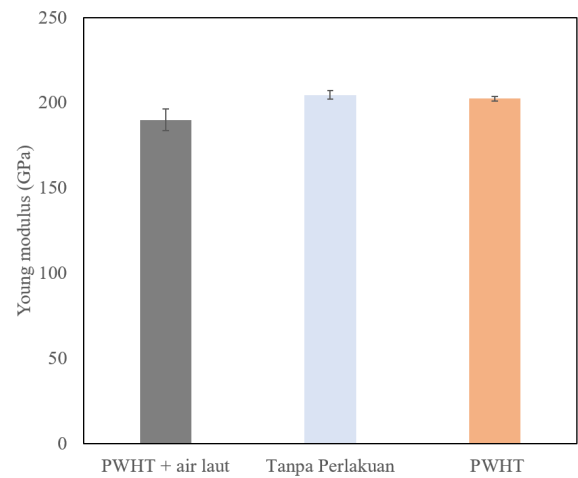
(c)
Gambar 6. Hasil uji Tarik (Kurva Load-Displacement) (a) Udara, (b) PWHT, (c) PWHT dan Air Laut



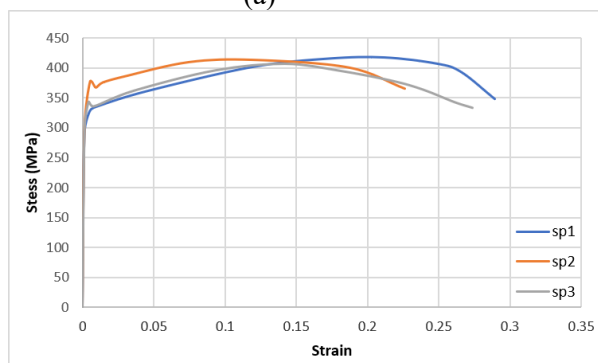
(a)



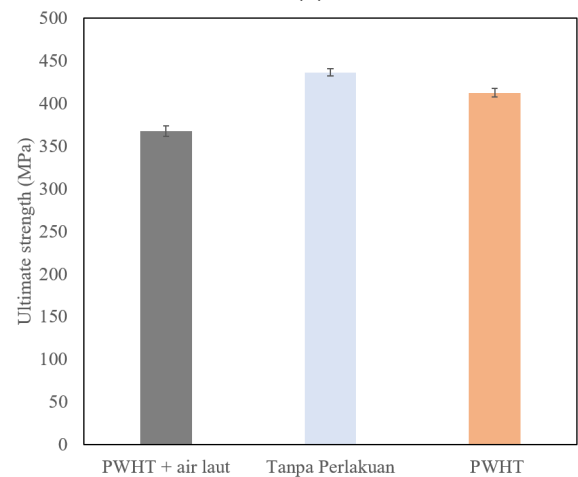
(a)



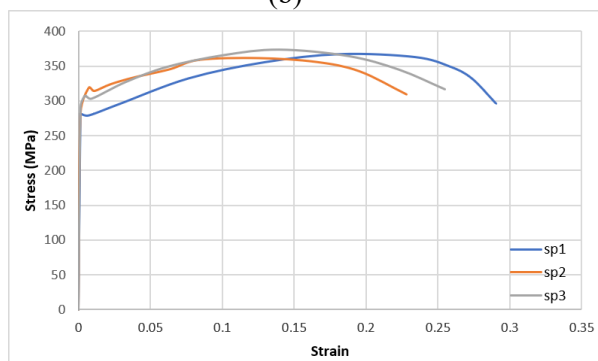
(b)



(b)

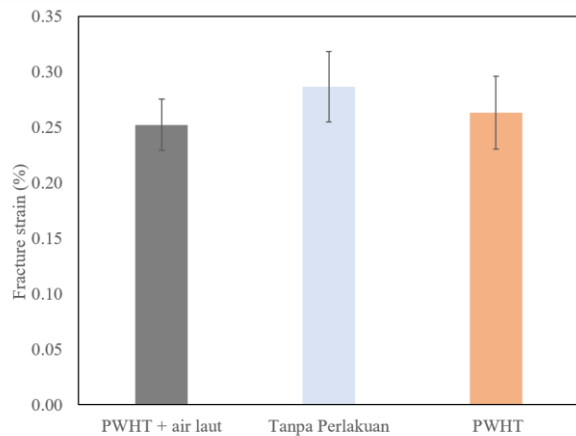


(c)

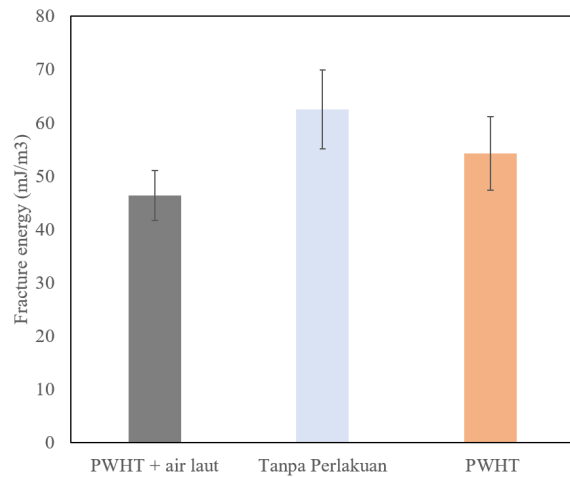


(c)

Gambar 7. Hasil uji Tarik (Stress - Strain) (a) Udara, (b) PWHT, (c) Air Laut



(d)



(e)

Gambar 8. Hasil uji tarik pada baja ASTM A36 :
(a) Kekuatan Luluh, (b) *Young Modulus*, (c) Kekuatan Tarik Tertinggi, (d) Regangan patah, (e) Energi Patah.

Berdasarkan hasil pengujian tarik, spesimen tanpa perlakuan menunjukkan performa terbaik dengan nilai rata-rata *ultimate tensile strength* sebesar 436,41 MPa, *fracture strain* sebesar 0,287, dan *fracture energy* sebesar 62,56 MJ/m³. Kurva *load-displacement* dan stress-strain menunjukkan bahwa spesimen ini mampu menahan beban tarik yang lebih tinggi serta mengalami deformasi yang lebih besar sebelum patah dibandingkan variasi lainnya. Setelah diberikan perlakuan PWHT, nilai *ultimate tensile strength* menurun menjadi 412,44 MPa dengan *fracture strain* sebesar 0,263 dan *fracture energy* sebesar 54,26 MJ/m³. Penurunan yang lebih signifikan terjadi pada spesimen dengan perlakuan pendinginan air laut, yang menghasilkan nilai *ultimate tensile strength* sebesar 367,75 MPa, *fracture strain* sebesar 0,25, dan *fracture energy* sebesar 46,42 MJ/m³. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perlakuan pendinginan air laut memengaruhi sifat mekanik sambungan las *dissimilar* SS304–ASTM A36 dengan menurunkan kekuatan tarik dan kemampuan deformasi plastis

material, meskipun perlakuan tersebut berkontribusi terhadap perbaikan homogenitas struktur mikro dan pengurangan tegangan sisa pada daerah las.



(a)



(b)



(c)

Gambar 9. Spesimen Setelah Diuji Tarik (a) Air laut dan PWHT, (b) *As-Welded*, (c) PHWT

Berdasarkan foto spesimen uji tarik yang Anda kirim, seluruh spesimen mengalami patah pada bagian bawah sisi ASTM A36 hingga akhirnya terjadi patah. Tidak ditemukannya patahan pada logam las maupun pada sisi SS304 mengindikasikan bahwa kualitas sambungan hasil pengelasan mampu mentransfer beban tarik secara efektif tanpa menjadi titik lemah. Dengan demikian, hasil uji tarik ini

menunjukkan bahwa ASTM A36 merupakan bagian dengan kekuatan terendah pada sambungan *dissimilar* SS304–ASTM A36, sehingga menjadi lokasi kegagalan pada seluruh spesimen yang diuji. Kondisi ini juga mengindikasikan bahwa integritas sambungan las yang dihasilkan telah memenuhi kriteria yang baik, karena kegagalan terjadi pada logam induk (*base metal failure*), bukan pada daerah las (*weld metal failure*). Hal ini menunjukkan bahwa kekuatan sambungan las melebihi kekuatan logam induk ASTM A36 sehingga kegagalan terjadi pada base metal (*base metal failure*). yang merupakan sisi ASTM A36, sedangkan bagian atas (SS304) tetap utuh dan tidak mengalami kegagalan. Hal ini menunjukkan bahwa kekuatan tarik sambungan las lebih tinggi daripada kekuatan logam induk ASTM A36, sehingga selama pembebanan, deformasi plastis terkonsentrasi pada

3.3 Hasil Pengujian Tekuk

Uji tekuk dilakukan untuk menilai kemampuan deformasi plastis dan ketahanan sambungan las terhadap beban lentur yang dipengaruhi oleh variasi media serta durasi pendinginan, dengan pelaksanaannya mengacu pada standar ASTM E290. Hasil pengujian tekuk dapat dilihat pada tabel 9,10 & 11. Tabel 4. Hasil Pengujian Tekuk

Tabel 9. Hasil Pengujian Tekuk (Air Laut)

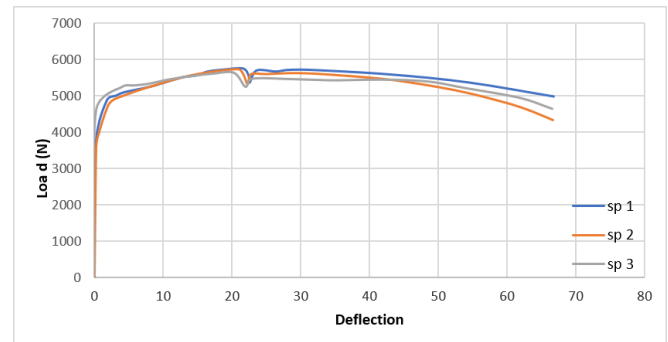
No.	Yield Strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Fracture strain (%)	Fracture energy (MJ/m ³)	Tangen MOE (GPa)
1	465.37	719.95	0.64	232.05	202.17
2	450.38	718.73	0.65	232.50	191.57
3	449.54	704.93	0.64	223.93	195.91
Rata-rata	455.10	714.54	0.64	229.50	196.55
stdev	8.91	8.34	0.01	4.82	5.33

Tabel 10. Hasil Pengujian Tekuk (*As-Welded*)

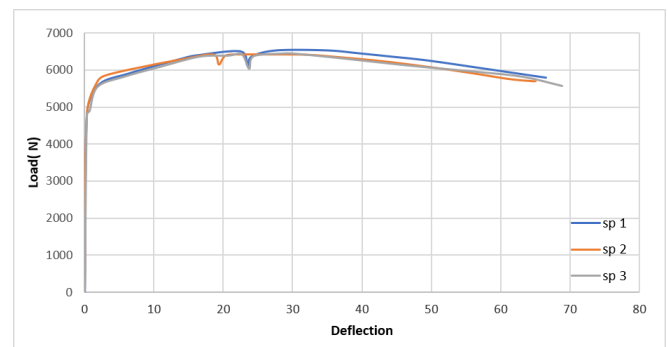
No.	Yield Strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Fracture strain (%)	Fracture energy (MJ/m ³)	Tangen MOE (GPa)
1	575.80	817.05	0.67	271.77	191.95
2	576.27	803.41	0.65	261.25	194.73
3	586.82	806.25	0.66	265.42	201.68
Rata-rata	579.63	808.90	0.66	266.15	196.12
stdev	6.23	7.19	0.01	5.30	5.01

Tabel 11. Hasil Pengujian Tekuk (PWHT)

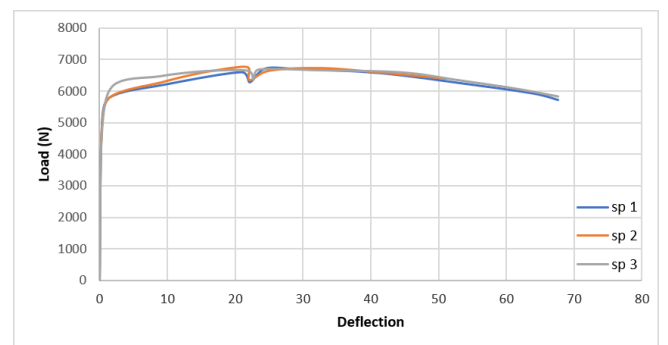
No.	Yield Strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Fracture strain (%)	Fracture energy (MJ/m ³)	Tangen MOE (GPa)
1	593.36	822.56	0.68	278.33	202.82
2	588.54	826.64	0.66	273.22	203.76
3	578.58	818.22	0.69	280.95	202.10
Rata-rata	586.82	822.47	0.67	277.50	202.89
stdev	7.54	4.21	0.01	3.93	0.83



(a)



(b)

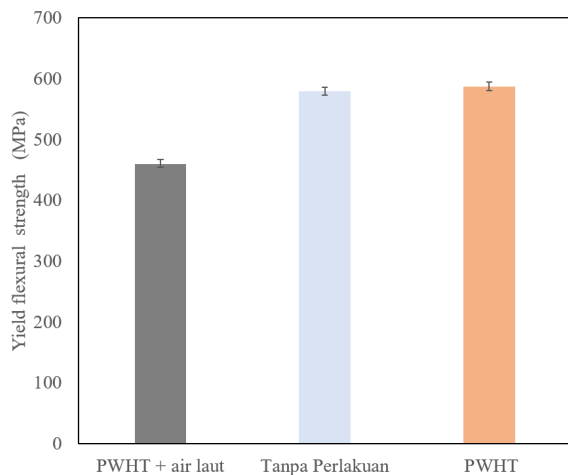


(c)

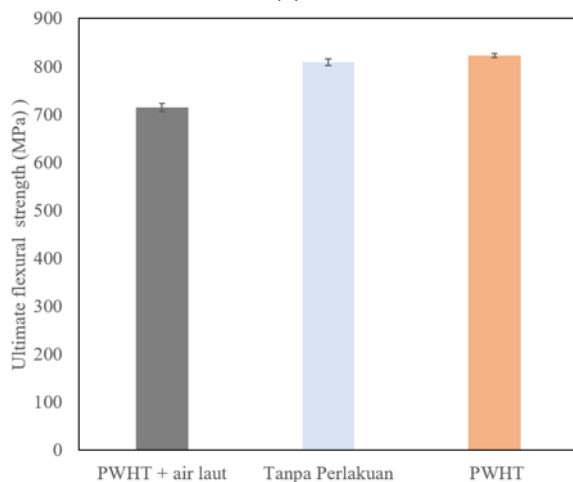
Gambar 10. Hasil uji tekuk (Kurva Load-Deflection) (a) Air Laut dan PWHT, (b) *As-welded* (c) PWHT

Berdasarkan hasil pengujian tekuk, spesimen dengan perlakuan *post-weld heat treatment* (PWHT) menunjukkan nilai *ultimate flexural strength* tertinggi, yaitu sebesar 822,47 MPa. Spesimen *as-welded* menghasilkan nilai *ultimate flexural strength* sebesar 808,90 MPa, sedangkan spesimen dengan perlakuan pendinginan air laut yang dilanjutkan dengan

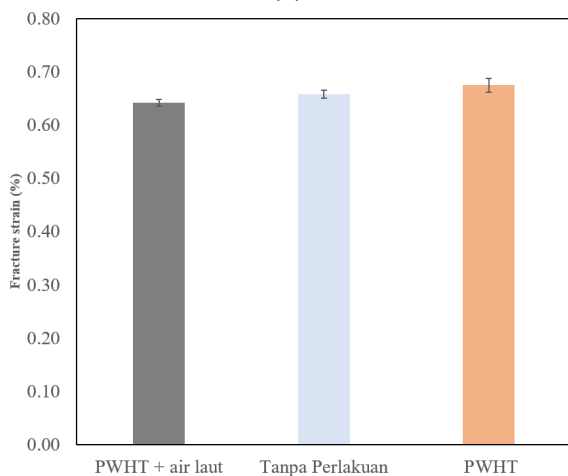
PWHT menghasilkan nilai terendah, yaitu sebesar 714,54 MPa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perlakuan PWHT memberikan peningkatan kemampuan sambungan dalam menahan pembebanan lentur dibandingkan kondisi *as-welded*, sedangkan kombinasi pendinginan air laut dan PWHT menghasilkan penurunan kemampuan menahan beban lentur. Kegagalan pada pengujian tekuk terjadi pada sisi material ASTM A36, sementara daerah sambungan las tetap dalam kondisi utuh.



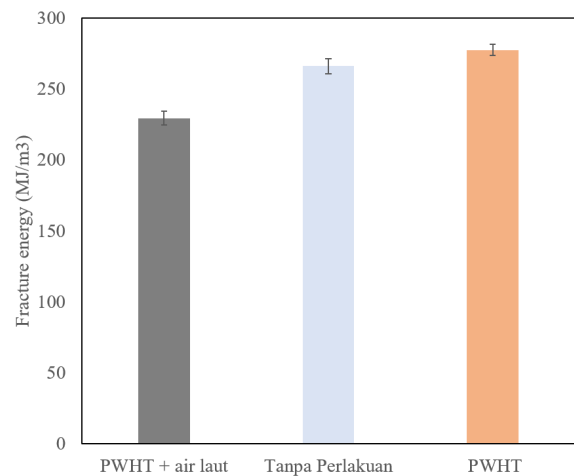
(a)



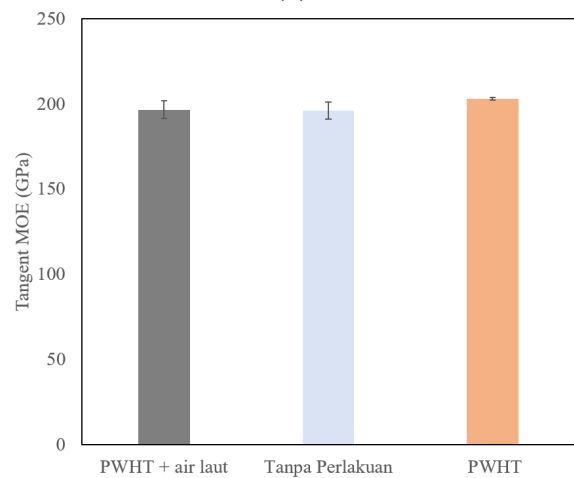
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 11. Hasil tekuk (a) Kekuatan Luluh, (b) Kekuatan Tekuk Maksimum, (c) Regangan Patah, (d) Energi Patah, (e) Modulus Elastisitas.

Berdasarkan hasil pengujian tekuk, spesimen dengan perlakuan *Post-weld heat treatment* (PWHT) menunjukkan performa pembebanan lentur terbaik dengan nilai rata-rata *yield strength* sebesar 586,82 MPa, *ultimate flexural strength* sebesar 822,47 MPa, *fracture strain* sebesar 0,67, dan *fracture energy* sebesar 277,50 MJ/m³. Kurva *load-deflection* menunjukkan bahwa spesimen PWHT mampu menerima beban lentur yang lebih besar sebelum mengalami kegagalan. Spesimen tanpa perlakuan (*as-welded*) menghasilkan nilai *yield strength* sebesar 602,46 MPa, *ultimate flexural strength* sebesar 808,90 MPa, *fracture strain* sebesar 0,66, dan *fracture energy* sebesar 203,82 MJ/m³. Sementara itu, spesimen dengan perlakuan pendinginan air laut yang dilanjutkan dengan PWHT menunjukkan nilai terendah, yaitu *yield strength* sebesar 455,10 MPa, *ultimate flexural strength* sebesar 714,54 MPa, *fracture strain* sebesar 0,64, dan *fracture energy* sebesar 229,50 MJ/m³. Hasil tersebut menunjukkan bahwa PWHT menghasilkan kemampuan pembebanan

lentur yang lebih tinggi dibandingkan kondisi *as-welded* dan air laut yang dilanjutkan dengan PWHT. Sebaliknya, kombinasi pendinginan air laut dan PWHT menghasilkan penurunan kemampuan sambungan dalam menerima beban lentur dan deformasi sebelum mengalami kegagalan.



(a)



(b)



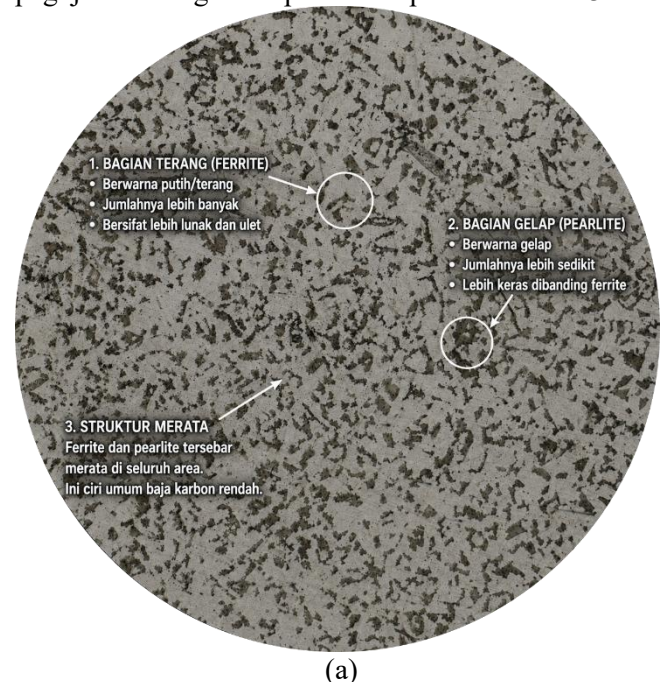
(c)

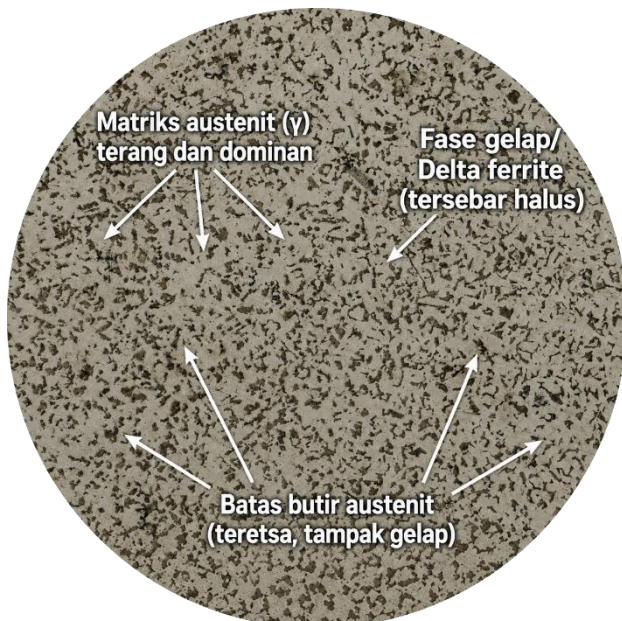
Gambar 12. Spesimen Setelah Diuji tekuk (a) Air Laut, (b) Tanpa Perlakuan. (c) PWHT.

Berdasarkan hasil uji tekuk (bend test), sambungan las *dissimilar* antara ASTM A36 dan SS304 mampu menahan pembebanan hingga membentuk sudut tekuk yang besar tanpa menunjukkan adanya retakan, patah, maupun delaminasi pada daerah logam las dan *Heat Affected Zone* (HAZ). Tekukan terjadi pada daerah sambungan las, sementara deformasi plastis setelah proses pembebanan tampak lebih dominan mengarah ke sisi ASTM A36. Hal ini menunjukkan bahwa ASTM A36 memiliki ketahanan terhadap deformasi yang lebih rendah dibandingkan SS304. Meskipun demikian, daerah sambungan tetap utuh selama pengujian, yang mengindikasikan bahwa ikatan metalurgi hasil pengelasan memiliki kualitas dan keuletan yang baik. Dengan demikian, hasil uji tekuk menunjukkan bahwa sambungan las *dissimilar* ASTM A36–SS304 memiliki integritas struktural yang baik serta mampu mendistribusikan beban secara efektif tanpa mengalami kegagalan pada daerah las maupun HAZ.

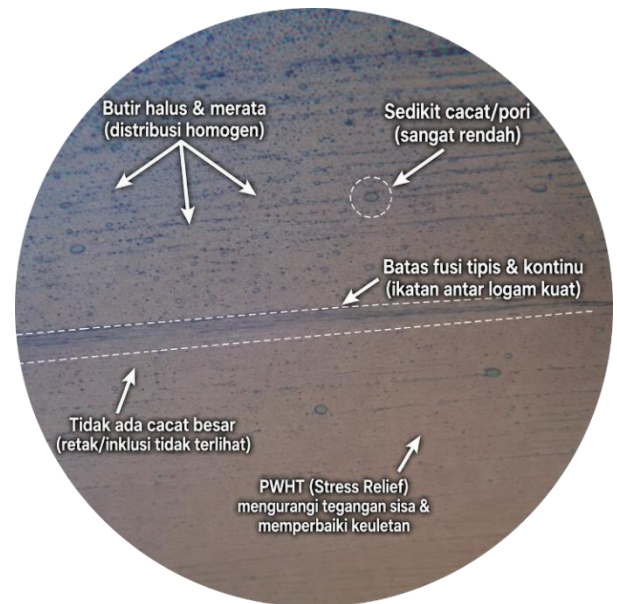
3.3. Hasil Pengujian Mikrografi

Pengujian struktur mikro dilakukan untuk mengidentifikasi dan menganalisis struktur yang terdapat pada spesimen penelitian melalui hasil berupa foto mikro [40]. Proses pengujian struktur mikro dilakukan guna mendapatkan hasil visual mikro dari hasil sambungan las [41]. Hasil pengujian mikrografi dapat dilihat pada Gambar 13.

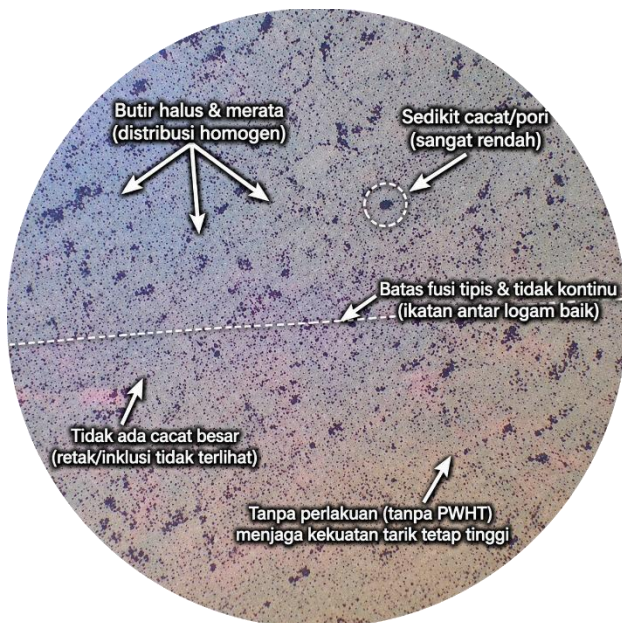




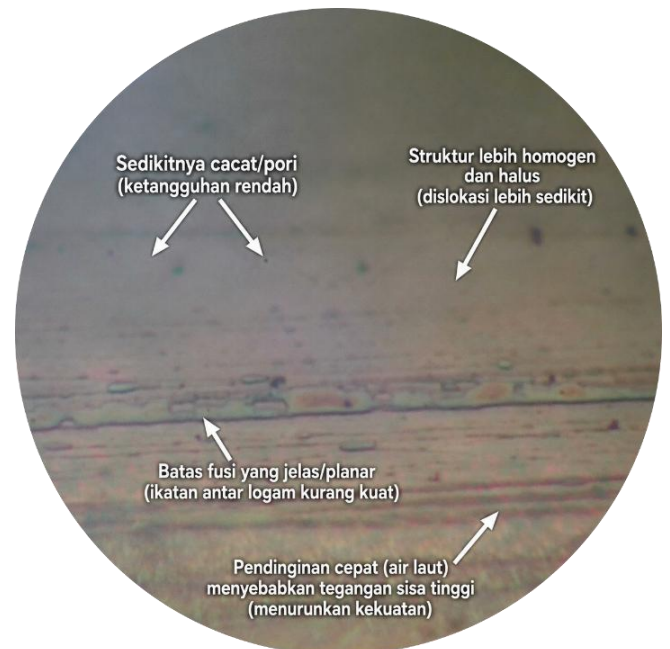
(b)



(c)



(c)



Gambar 13. (a) Struktur Mikro ASTM A36, (b) Struktur Mikro SS 304, (c) Struktur Mikro *As-welded* (d) Struktur Mikro Variasi PWHT, (e) Struktur Mikro Perlakuan Air Laut dan PWHT

Bagian ini memaparkan hasil pengamatan mikrofografi pada sambungan las *dissimilar* antara baja ASTM A36 dan *stainless steel* SS 304 yang dibuat dengan metode TIG. Hasil menunjukkan bahwa perlakuan pendinginan serta *post weld heat treatment* (PWHT) memberikan pengaruh terhadap karakteristik struktur mikro pada daerah weld metal dan *heat affected zone* (HAZ). Pada spesimen tanpa perlakuan, terlihat distribusi butiran yang relatif halus dan merata dengan batas fusi yang tipis serta ikatan antar logam yang baik, serta tidak ditemukan cacat yang berarti seperti

retak maupun inklusi, yang menunjukkan kualitas sambungan las yang cukup baik.

Pada spesimen tanpa PWHT, jumlah pori yang terbentuk relatif sangat minimal dan terdistribusi secara acak. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses pengelasan berjalan dengan stabil disertai perlindungan gas yang efektif. Struktur mikro yang lebih padat dan merata mengakibatkan sambungan memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan variasi perlakuan lain. Namun begitu, masih terdapat potensi pembentukan tegangan sisa akibat pendinginan alami setelah pengelasan.

Penerapan media pendingin air laut mengakibatkan laju pendinginan meningkat drastis sehingga menghasilkan ukuran butir yang lebih dan rapat. Pendinginan cepat tersebut meningkatkan kekerasan material, namun pada beberapa area terlihat kecenderungan pembentukan zona yang lebih getas akibat transformasi struktur mikro di area HAZ. Meskipun demikian, cacat mikro yang timbul masih berada dalam kategori rendah sehingga kualitas sambungan tetap terjaga dengan baik.

Sementara itu, perlakuan PWHT pada suhu 600°C selama 30 menit berhasil memperbaiki homogenitas struktur mikro dengan menurunkan tegangan sisa yang muncul setelah proses pengelasan. Struktur mikro setelah PWHT tampak lebih seragam dengan batas butir yang lebih jelas serta distribusi fasa yang lebih merata. Perlakuan ini juga mengurangi potensi sifat getas pada area HAZ sehingga meningkatkan keuletan sambungan las.

Berdasarkan hasil penelitian penyambungan las *dissimilar* antara *stainless steel* SS 304 dan baja karbon ASTM A36 menggunakan metode *tungsten inert gas* (TIG) dengan elektroda ER309L, dapat disimpulkan bahwa variasi perlakuan *as-welded*, *post-weld heat treatment* (PWHT), serta pendinginan air laut yang dilanjutkan dengan PWHT memberikan pengaruh terhadap sifat mekanik dan struktur mikro sambungan las.

Perlakuan PWHT pada suhu 600°C dengan waktu penahanan selama 30 menit menghasilkan perubahan pada karakteristik struktur mikro sambungan las. Perlakuan tersebut memengaruhi kondisi daerah *Heat Affected Zone* (HAZ) dan daerah logam las akibat adanya siklus pemanasan setelah proses pengelasan. Sementara itu, pemberian pendinginan menggunakan air laut sebelum PWHT menghasilkan laju pendinginan yang lebih cepat dibandingkan kondisi *as-welded*, sehingga menyebabkan perubahan karakteristik struktur mikro pada daerah sambungan.

Hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa spesimen *as-welded* memiliki kemampuan

menahan beban tarik yang lebih tinggi dibandingkan spesimen dengan perlakuan PWHT maupun kombinasi air laut dan PWHT. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penerapan PWHT tidak selalu meningkatkan kekuatan tarik sambungan las *dissimilar*. Perlakuan air laut yang dilanjutkan dengan PWHT juga tidak memberikan peningkatan kekuatan sambungan, bahkan menghasilkan nilai kekuatan tarik yang lebih rendah dibandingkan kondisi *as-welded* dan PWHT.

Berdasarkan hasil pengujian tekuk, spesimen dengan perlakuan PWHT menunjukkan kemampuan pembebanan lentur tertinggi dengan *ultimate flexural strength* sebesar 822,47 MPa, sedangkan spesimen *as-welded* sebesar 808,90 MPa dan spesimen dengan perlakuan air laut yang dilanjutkan dengan PWHT sebesar 714,54 MPa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa PWHT memberikan pengaruh positif terhadap kemampuan sambungan dalam menerima pembebanan lentur, sedangkan kombinasi pendinginan air laut dan PWHT menghasilkan kemampuan pembebanan lentur paling rendah.

Hasil pengamatan struktur mikro menunjukkan adanya perbedaan karakteristik pada daerah *base metal*, HAZ, dan *weld metal* akibat variasi perlakuan yang diberikan. Perubahan struktur mikro tersebut berkaitan dengan perbedaan riwayat termal dan laju pendinginan pada masing-masing kondisi. Berdasarkan keseluruhan hasil pengujian, kondisi *as-welded* memberikan hasil yang lebih baik pada pengujian tarik, sedangkan PWHT memberikan hasil terbaik pada pengujian tekuk. Adapun kombinasi pendinginan air laut dan PWHT tidak menunjukkan peningkatan sifat mekanik secara keseluruhan dibandingkan kondisi tanpa perlakuan.

Dengan demikian, penggunaan PWHT pada sambungan las *dissimilar* SS 304–ASTM A36 perlu disesuaikan dengan karakteristik sifat mekanik yang ingin dicapai. Berdasarkan hasil penelitian ini, PWHT lebih memberikan pengaruh terhadap kemampuan sambungan dalam menerima pembebanan lentur, sedangkan kondisi *as-welded* memberikan hasil kekuatan tarik yang lebih tinggi. Kombinasi pendinginan air laut dan PWHT belum menunjukkan peningkatan performa mekanik secara keseluruhan pada sambungan yang diteliti.

4. Kesimpulan

Berdasarkan kajian penelitian penyambungan las *dissimilar* antara *stainless steel* SS 304 dan baja karbon ASTM A36 menggunakan metode *tungsten inert gas* (TIG), dapat ditarik kesimpulan bahwa variasi media pendingin dan perlakuan *post weld heat treatment* (PWHT) berpengaruh nyata

terhadap karakteristik mekanik dan struktur mikro sambungan las. Penerapan media pendingin air laut mampu meningkatkan kecepatan pendinginan sehingga menghasilkan struktur mikro yang lebih halus dan padat dibandingkan pendinginan udara.

Perlakuan PWHT pada suhu 600°C selama 30 menit diduga menghasilkan distribusi mikrostruktur yang lebih homogen pada daerah HAZ berdasarkan hasil pengamatan mikrostruktur. Struktur mikro pasca PWHT menunjukkan distribusi butir yang lebih sering, batas fusi yang lebih jelas, serta penurunan potensi sifat getas pada sambungan las. Hasil pengujian tarik mengungkapkan bahwa sambungan las yang terbebas dari cacat signifikan dan memiliki struktur mikro homogen cenderung menunjukkan nilai kekuatan tarik yang lebih besar. Di sisi lain, Pendinginan cepat berpotensi memengaruhi karakteristik mikrostruktur sehingga sifat mekanik sambungan mengalami perubahan.

Pendinginan yang lebih cepat saat dengan media air laut cenderung menghasilkan struktur martensit dalam jumlah yang lebih besar pada sisi baja karbon tinggi, sehingga meningkatkan kekerasan dan kekuatan sambungan namun berpotensi menurunkan keuletan material [4].

Berdasarkan hasil pengujian mekanik, sambungan las *dissimilar* ASTM A36–SS304 pada kondisi *as-welded* menunjukkan performa terbaik dengan nilai UTS sebesar 436,41 MPa, regangan patah sebesar 0,287, energi patah sebesar 62,56 mJ/mm³, dan kekuatan lentur sebesar 600,46 MPa. Perlakuan PWHT menghasilkan sifat mekanik yang relatif stabil dengan nilai UTS sebesar 412,44 MPa dan kekuatan lentur sebesar 586,82 MPa. Sementara itu, kombinasi pendinginan air laut dan PWHT menghasilkan penurunan sifat mekanik paling signifikan dengan nilai UTS sebesar 367,75 MPa, regangan patah sebesar 0,252, energi patah sebesar 46,42 mJ/mm³, dan kekuatan lentur sebesar 455,10 MPa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi *as-welded* memberikan kombinasi kekuatan tarik dan kekuatan lentur terbaik pada sambungan las *dissimilar* ASTM A36–SS304.

Secara keseluruhan, variasi media pendingin dan perlakuan PWHT memberikan pengaruh terhadap sifat mekanik dan karakteristik mikrostruktur sambungan las *dissimilar* ASTM A36–SS304. Kondisi *as-welded* menghasilkan kekuatan tarik tertinggi, sedangkan perlakuan PWHT memberikan performa terbaik pada pengujian tekuk. Dengan demikian, perlakuan pasca pengelasan merupakan faktor krusial dalam meningkatkan performa dan keandalan sambungan las *dissimilar* untuk aplikasi perkapalan dan rekayasa material.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] F. J. Tulung, “Modul praktek pengelasan smaw,” *Politek. Negeri Manad.*, pp. 1–74, 2019, [Online]. Available: <http://mesin.polimdo.ac.id/wp-content/uploads/2019/02/Modul-Pengelasan-SMAW.pdf>
- [2] N. Habibpour, A. Shafyei, R. A. Najafabadi, and A. Meysami, “Effects of *post-weld heat treatment* temperature on the microstructure and mechanical properties of welded A517-Gr.B steel by SMAW method,” *Metall. Res. Technol.*, vol. 114, no. 3, 2017, doi: 10.1051/metal/2017032.
- [3] Z. Wang, Z. Feng, L. Zhang, and M. X. Lu, “Current application and development trend in electrochemical measurement methods for the corrosion study of *stainless steels* [电学方法在不锈钢腐蚀研究中的应用现状及发展趋势],” *Gongcheng Kexue Xuebao/Chinese J. Eng.*, vol. 42, no. 5, pp. 549–556, May 2020, doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2019.05.15.002.
- [4] D. Bonfil, L. Veleza, and J. I. Escalante-Garcia, “*Stainless steel* 304 and Carbon Mild Steel A36 Activity in Chloride-Containing Hybrid Pumice-Portland Cement Extract Pore Environment,” *Materials (Basel)*, vol. 18, no. 6, Mar. 2025, doi: 10.3390/ma18061216.
- [5] M. Shobirin and M. Mulyadi, “Analisa Pengaruh Variasi Arus pada Pengelasan GTAW di Tinjau dari Pengujian Tarik pada Material Plat ASTM A36,” *Innov. Technol. Methodical Res. J.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–10, 2024, doi: 10.47134/innovative.v3i1.99.
- [6] N. Nurudin, A. T. A. Salim, I. Yuwono, A. Rahmatika, and S. Suparman, “Analisis Sambungan Las Gmaw Baja Astm a36 Yang Terpapar Panas Tinggi Dan Pendinginan Cepat,” *JTT (Jurnal Teknol. Ter.)*, vol. 8, no. 2, p. 166, 2022, doi: 10.31884/jtt.v8i2.436.
- [7] W. Winarto, M. Anis, R. Riastuti, and I. N. Suarjana, “Study the Effect of Welding Position and Plate Thickness to the Mechanical and Microstructural Properties of the TIG Dissimilar Metal Welded between Carbon Steel ASTM A36 and *Stainless steel* 304 Plates,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 1000, pp. 364–372, 2020, doi: 10.4028/www.scientificdata.1000.364.
- [8] D. Wicaksono, M. N. Ilman, and N. A. Triwibowo, “Effect of preheating on mechanical properties and corrosion behavior of dissimilar GMAW joints

- between austenitic *stainless steel* and low carbon steel,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 2592, no. 1, May 2023, doi: 10.1063/5.0115111/2888040.
- [9] C. Moolwan, P. Surin, and S. Thermsuk, “Microstructural evolution and mechanical properties of plasma arc welded SUS304–SS400 dissimilar joints: Experimental characterization and process optimization,” *Results Eng.*, vol. 29, p. 108764, Mar. 2026, doi: 10.1016/J.RINENG.2025.108764.
- [10] R. Waheed, H. A. Saeed, S. U. Butt, and Z. Faraz, “The Effect of Physical Properties on Welding Induced Distortion in Dissimilar Steel Lap Joint,” *Proc. 18th Int. Bhurban Conf. Appl. Sci. Technol. IBCAST 2021*, pp. 1–5, Jan. 2021, doi: 10.1109/IBCAST51254.2021.9393165.
- [11] I. Artikel, “Jurnal Penelitian dan Teknologi Material,” vol. 33, no. November, pp. 8768–8779, 2024.
- [12] Bagus Prasetyo Anggoro, “Pengaruh Variasi Arus Listrik Pengelasan Tungsten Inert Gas (Tig) Terhadap Kekuatan Tarik Sambungan Las Pada *Stainless steel* Ss 304,” *Jtm*, vol. 09, no. 04, pp. 119–122, 2021.
- [13] N. Hasanah, R. R. Hendaryatu, Budiono, and B. S. A. Pradana, “The effect of cooling media on mechanical properties of welded ST37 steel,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 2453, Jul. 2022, doi: 10.1063/5.0095215.
- [14] D. Ioannidou, M. Foinikaridis, S. Deligiannis, and P. E. Tsakiridis, “Microstructural Evaluation of Inconel 718 and AISI 304L Dissimilar TIG Joints,” *Met. 2024, Vol. 14, Page 54*, vol. 14, no. 1, p. 54, Dec. 2023, doi: 10.3390/MET14010054.
- [15] S. Singh, V. Chawla, and G. Brar, “THE PERFORMANCE OF TIG WELDED SIMILAR AND DISSIMILAR WELDMENTS UNDER TENSILE LOADING: AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION,” www.tjprc.org *SCOPUS Index. J. Ed.*, Accessed: Jun. 15, 2026. [Online]. Available: www.tjprc.org
- [16] T. Mulya Prayogo and T. H. Ningsih, “Pengaruh Holding Time Pwht Terhadap Kekuatan Tarik Pada Proses Pengelasan Smaw Baja S45C,” *Agustus*, vol. 2, no. 1, pp. 77–83, 2023, [Online]. Available: <http://jurnal.poliwangi.ac.id/index.php/jinggo/>
- [17] S. S. Murugan, S. Kattimani, R. Saminathan, and M. J. I. Raj, “Investigation of Single-Sided TIG Welding in Dissimilar AISI 316L and 304L *Stainless steel* Joints,” *Ann. “Dunarea Jos” Univ. Galati. Fascicle XII, Weld. Equip. Technol.*, vol. 36, pp. 25–32, Dec. 2025, doi: 10.35219/AWET.2025.03.
- [18] D. Jin, Z. Wang, Z. Han, J. Yu, Q. Wang, and J. Kang, “Effect of *post-weld heat treatment* on microstructure and mechanical properties of T92/HR3C dissimilar metal welded joints[焊后热处理对T92/HR3C异种钢接头组织和力学性能的影响],” *Jinshu Rechuli/Heat Treat. Met.*, vol. 48, no. 10, pp. 102–108, Oct. 2023, doi: 10.13251/j.issn.0254-6051.2023.10.014.
- [19] R. Kumar, A. Varma, Y. R. Kumar, S. Neelakantan, and J. Jain, “Enhancement of mechanical properties through modified *post-weld heat treatment* processes of T91 and Super304H dissimilar welded joint,” *J. Manuf. Process.*, vol. 78, pp. 59–70, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.jmapro.2022.04.008.
- [20] S. Karthi, S. P. Kumaresh Babu, S. Shanmugham, and V. P. Balaji, “Study on the Dissimilar Joining of Martensitic *Stainless steel* and Carbon Steel Using TIG Welding,” *Lect. Notes Multidiscip. Ind. Eng.*, vol. Part F164, pp. 545–554, 2020, doi: 10.1007/978-981-32-9433-2_47/SAVE-RESEARCH.
- [21] M. R. Maghfiroh, G. Soebiyakto, and A. Farid, “Analisa Pengaruh Variasi Media Pendingin Air Dan Oli Pada Sambungan Lap Joint Terhadap Sifat Mekanik Menggunakan Las SMAW,” *Proton*, vol. 11, no. 1, pp. 35–42, 2019.
- [22] L. Liu, L. Wang, S. Yu, and M. Li, “Mechanical Properties of Steel Strands Cooled by Different Methods After High-Temperature Treatment,” *Int. J. Steel Struct.*, vol. 22, no. 1, pp. 333–342, Feb. 2022, doi: 10.1007/s13296-022-00578-2.
- [23] J. Speer, D. K. Matlock, B. C. De Cooman, and J. G. Schroth, “Carbon partitioning into austenite after martensite transformation,” *Acta Mater.*, vol. 51, no. 9, pp. 2611–2622, May 2003, doi: 10.1016/S1359-6454(03)00059-4.
- [24] Y. You, C. Shang, N. Wenjin, and S. Subramanian, “Investigation on the microstructure and toughness of coarse grained heat affected zone in X-100 multi-phase pipeline steel with high Nb content,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 558, pp. 692–701, Dec. 2012, doi: 10.1016/J.MSEA.2012.08.077.
- [25] O. M. Ikumapayi, I. P. Okokpujie, S. A.

- Afolalu, O. O. Ajayi, E. T. Akilabi, and O. P. Bodunde, "Effects of Quenchants on Impact Strength of Single-Vee Butt Welded Joint of Mild Steel," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 391, no. 1, p. 012007, Jul. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/391/1/012007.
- [26] A. Shazad and M. Uzair, "Impact of Quenching Medium on Tensile Properties and Hardness of 15CDV6 TIG Welded Joints," *Met. Sci. Heat Treat.* 2025 6611, vol. 66, no. 11, pp. 701–707, May 2025, doi: 10.1007/S11041-025-01106-9.
- [27] T. G. T. Nindhia, I. Wayan Surata, I. Wayan Bandem Adnyana, and I. Gusti Komang Dwijana, "The effect of sea water corrosion on tensile strength of combination welded joint of *stainless steel* 304-201," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1007, no. 1, p. 012122, Dec. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/1007/1/012122.
- [28] T. Sonar, V. Balasubramanian, S. Malarvizhi, T. Venkateswaran, and D. Sivakumar, "Influence of InterPulsed TIG Welding Parameters on the Evolution of Microstructure and Tensile Properties of Su-718 Alloy Sheets," *Mater. Perform. Charact.*, vol. 10, no. 2, pp. 291–321, Jun. 2021, doi: 10.1520/MPC20200083.
- [29] M. T. Sai, T. D. Nguyen, A. X. Nguyen, V. Q. Vu, D. N. Nguyen, and M. K. Pham, "Influence of Heat Treatment on the Microstructure of TIG Welding Between Ti–6Al–4V and Ti–CP," *Trans. Indian Inst. Met.* 2025 7811, vol. 78, no. 11, pp. 245–, Oct. 2025, doi: 10.1007/S12666-025-03730-8.
- [30] T. Węgrzyn, J. Piwnik, Z. Stanik, D. Węgrzyn, and D. Sieteski, "Impact toughness of steel WMD after TIG welding," *Arch. Metall. Mater.*, vol. 62, no. 3, pp. 1647–1650, Sep. 2017, doi: 10.1515/AMM-2017-0252.
- [31] R. S. Mishra and Z. Y. Ma, "Friction stir welding and processing," *Mater. Sci. Eng. R Reports*, vol. 50, no. 1–2, pp. 1–78, Aug. 2005, doi: 10.1016/J.MSER.2005.07.001.
- [32] B. Arivazhagan and M. Vasudevan, "A comparative study on the effect of GTAW processes on the microstructure and mechanical properties of P91 steel weld joints," *J. Manuf. Process.*, vol. 16, no. 2, pp. 305–311, Apr. 2014, doi: 10.1016/J.JMAPRO.2014.01.003.
- [33] R. S. Vidyarthi, A. Kulkarni, and D. K. Dwivedi, "Study of microstructure and mechanical property relationships of A-TIG welded P91–316L dissimilar steel joint," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 695, pp. 249–257, May 2017, doi: 10.1016/J.MSEA.2017.04.038.
- [34] T. Sakthivel *et al.*, "Comparison of creep rupture behaviour of type 316L(N) austenitic *stainless steel* joints welded by TIG and activated TIG welding processes," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 528, no. 22–23, pp. 6971–6980, Aug. 2011, doi: 10.1016/J.MSEA.2011.05.052.
- [35] N. H. Tho, B. Aceh, A. Phu, D. Campus, H. Chi, and M. City, "J u r n a l P o l i m e s i n," vol. 20, no. 2, pp. 217–221, 2022.
- [36] U. Sriwijaya and S. Sumatra, "MICROSTRUCTURAL EVOLUTION AND MECHANICAL PERFORMANCE OF SMAW DISSIMILAR WELDS BETWEEN ASTM A36 AND AISI 316 WITH E316-16 ELECTRODE AT DIFFERENT WELDING CURRENTS," vol. 6, no. 3, pp. 157–165, 2025.
- [37] K. R. Nutthapong, K. Sonthaya, and K. Anusorn, "EFFECT OF ENERGY AND ENVIRONMENT ON WELDED JOINTS BETWEEN SS304 AND Q245 USING GTAW," vol. 12, no. 2, pp. 1–14, 2025.
- [38] H. Zhang, X. Chen, Z. Yang, and B. Ding, "W–ThO₂ thermionic cathode activated with nanoscale oxide," *Mater. Lett.*, vol. 38, no. 6, pp. 401–405, Mar. 1999, doi: 10.1016/S0167-577X(98)00197-9.
- [39] U. Fasel, D. Keidel, P. Ermanni, L. Baumann, and G. Cavolina, "Surat Manufaktur," vol. 23, pp. 85–88, 2020.
- [40] M. O. F. S. C. Steel, "TRAKSI: Majalah Ilmiah Teknik Mesin," vol. 22, no. 1, pp. 119–131, 2022.
- [41] S. T. Mesin, F. Teknik, U. N. Surabaya, J. T. Mesin, F. Teknik, and U. N. Surabaya, "HASIL PENGELASAN ALUMINIUM 5083 DENGAN LAS TIG," 2000.
- [42] D. P. Koistinen and R. E. Marburger, "A general equation prescribing the extent of the austenite-martensite transformation in pure iron-carbon alloys and plain carbon steels," *Acta Metall.*, vol. 7, no. 1, pp. 59–60, Jan. 1959, doi: 10.1016/0001-6160(59)90170-1